

氏 名	中 田 吉 彦
生 年 月 日	
本 籍	石川県
学 位 の 種 類	博士(工学)
学 位 記 番 号	博甲第481号
学位授与の日付	平成14年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	個別要素法による落石覆工の衝撃問題解析に関する研究
論文審査委員(主査)	榊谷 浩(工学部・助教授)
論文審査委員(副査)	梶川 康男(自然科学研究科・教授) 尾田 十八(工学部・教授) 五十嵐心一(工学部・助教授) 園田恵一郎(大阪工業大学工学部・教授)

## 学 位 論 文 要 旨

In this study, we develop the method of analysis by the distinct element method to investigate fundamental characteristics of behavior of reinforced concrete beam and to obtain basic data for the establishment of the rational design method. It could be shown that this method is effective to compare with experimental results and theoretical results.

The first aim of this study is achieved the experiments under relatively low speed impact to make those fundamental behavior clear. At first, the characteristics of failure mode, impact load, displacement and absorbed energy of reinforced concrete beams under many conditions are concretely investigated. Secondary, distinct element method is applied to the analysis of reinforced concrete beam under impact to supplement the experiment, and it could be shown that this method is effective to compare with experimental results.

The second aim of this study is to elucidate the impact behavior of rock fall prevention structure. In the situation where there is a buffer layer, such as a sand cushion layer, a numerical analysis method is applied to measure the impact of the rock fall. This method of analysis combines distinct element method and finite element method. After analysis, the relationship between falling height, mass of the rock, duration of impact and eigen period of the structure, have become clear on the basis of the numerical results gathered from multiple and varying rock fall conditions. The characteristics and ratio of the transmitted energy have also been clarified. Finally, a relatively simple, but accurate method of estimating the ratio of energy transmitted to the preventative structure has been introduced.

### 1. 研究の背景と本研究の目的

落石覆工への落石の衝突は衝撃問題であり、その力学的挙動は静的の場合と比べて非常に複雑であるため、衝撃力の特性、構造物の剛性、構成する材料特性に及ぼすひずみ速度依存性や構造物内の応力波伝播等を考慮できる非線形動的解析法が望まれている。また落石覆工の落石時の衝撃挙動と落石より緩衝材を通して覆工に伝わるエネルギー、さらには一般的な衝撃荷重下での各種構造部材の破壊挙動とそのじん性の評価について十分明らかにされているわけではなく、設計の具体的プロセスまで至っていないのが現状である。

このような背景から、本研究では、RC はりの重錘衝突による衝撃挙動特性を解明し、落石覆

工などの衝撃を受ける構造物の合理的設計法の基礎的資料を提供する一手法として個別要素法を用いた解析手法の開発を行い、理論解や実験値と検証上で本解析手法の有効性を明らかにすることを目的としている。

まず第1の目的として、各種構造部材の中でも最も基本的な部材の一つであるRCはりの重錘落下衝撃実験を行い、種々の条件の相違によるRCはりの破壊形態や荷重、変位、吸収エネルギー、曲率分布等の衝撃挙動特性を明らかにし、また実験を補間する上で個別要素法によるRCはりの衝撃解析の適用を行い、実験結果との比較・検討を行った上でその妥当性を示すことである。

第2の目的としては、落石による落石覆工の衝撃挙動と落石より緩衝材を通じて覆工に伝わる伝達力および伝達エネルギーを明らかにすることである。現在の落石覆工の設計法には、落石の衝撃荷重を静的荷重とした上で、許容応力度設計法が採用されている。また、落石による衝撃力（設計荷重）には、Hertzの弾性接触理論に基づき、落石とサンドクッションとの間の衝突面で発生する重錘衝撃力を採用している。しかし、落石覆工は、覆工屋根上に緩衝材としてサンドクッションを有する構造形式をとるため、本来、設計に用いる落石の衝撃力はサンドクッションを介して覆工に伝達される力（伝達衝撃力）を評価すべきであると考え、この伝達衝撃力等について解明する。具体的には、落石衝突時に離散体であるサンドクッションを個別要素法により、また連続体である覆工屋根を有限要素法によりハイブリッドさせた解析方法を開発し、落石-サンドクッション-覆工への伝達される力学関係を明らかにする。

## 2. 個別要素法による数値解析手法

本研究で用いた離散化解析手法は、Cundall[1]が提案した粒状体を対象とした離散化モデルである個別要素法(Distinct Element Method:DEM)である。当初、この手法は地盤、石、岩盤を含む土を対象とした不連続性岩盤の動的崩壊や土石流等の解析について行われていたが、接触要素間のばねにある程度の引張抵抗を持たせることにより、近年、コンクリート構造物の動的破壊現象にも適用されてきている。

図-1に示す通り、連続体であるコンクリートはりを2次元問題として有限個の剛要素の集合体と仮定し、要素の持つ弾性的および非弾性的性質を剛体の接触点間に挿入したばねとダッシュポットによって表現する。

Cundallは要素のモデルとして、多角形要素を用いたが、多角形要素では流動する要素間の時間ステップごとの接触判定が複雑で、接触判定に非常に時間を要する。そこで、木山、藤村は円筒要素を適用することにより、計算の簡略化を行っている。本研究においても同様に円筒要素を用いることにした。円筒要素を用いた場合、図-2に示すように要素 $i$ と $j$ を考えると、2つの要素が接触する要件は、それぞれの半径を $r_i$ と $r_j$ とすると、次式で表される。

$$R_{ij} \leq r_i + r_j \quad (1)$$

ここで、 $R_{ij}$ は要素 $i$ と要素 $j$ の中心間距離であり、それぞれの座標を用いて、

$$\begin{aligned} R_{ij} &\leq \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \\ x_i &= x_i^0 + u_i, x_j = x_j^0 + u_j \\ y_i &= y_i^0 + v_i, y_j = y_j^0 + v_j \end{aligned} \quad (2)$$

と表すことができる。 $(x_i^0, y_i^0), (x_j^0, y_j^0)$ は、それぞれ要素 $i$ と $j$ の中心の初期座標値であり、 $(u_i, v_i), (u_j, v_j)$ は変形成分である。

なお、コンクリートすなわち個々の剛要素の水平 $u$ 、鉛直 $v$ および回転 $\phi$ における運動方程式は、以下に示す時間に関する差分法である。

$$\begin{aligned}
m[\ddot{u}]_t &= -c[\dot{u}]_{t-\Delta t} - k[u]_{t-\Delta t} \\
m[\ddot{v}]_t &= -c[\dot{v}]_{t-\Delta t} - k[v]_{t-\Delta t} \\
I[\ddot{\phi}]_t &= -cr^2[\dot{\phi}]_{t-\Delta t} - kr^2[\phi]_{t-\Delta t}
\end{aligned} \tag{3}$$

ここで  $m$  および  $I$  は、それぞれ各要素の質量および慣性モーメントであり、 $k$ 、 $c$  はそれぞればね定数および減衰係数である。また、 $r$  は要素を円筒とみなしたときの半径である。なお、式中のドット ( $\cdot$ ) は時間に関する微分を表している。

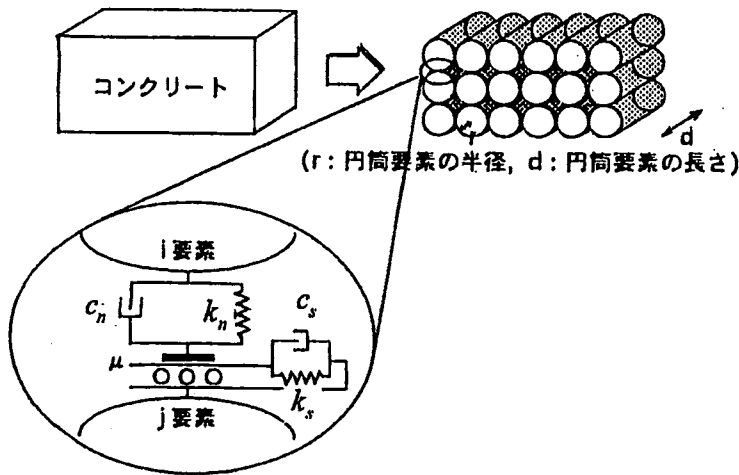


図-1 要素間の粘弾性モデル

要素間の法線方向の基準ばね定数

$$k_n = \frac{EA}{2r} = Ed$$

要素間の接線方向の基準ばね定数

$$k_s = \frac{k_n}{2(1+\nu)}$$

$E$ :弾性係数,  $\nu$ :ポアソン比

$A$ :円筒要素の投影面積 ( $2r \cdot d$ )

$c_n$ :要素間の法線方向減衰係数

$c_s$ :要素間の接線方向減衰係数

$\mu$ :摩擦係数

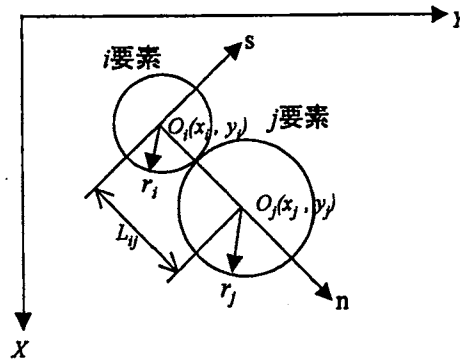


図-2 要素の接触

$$R_{ij} \leq \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

$$x_i = x_i^0 + u_i, x_j = x_j^0 + u_j$$

$$y_i = y_i^0 + v_i, y_j = y_j^0 + v_j$$

### 3. 個別要素法の連続体衝撃問題への適用

ここでは、粒状体の解析に用いられてきた個別要素法を発展させ、連続体の衝撃問題への適用について検討した。具体的には、弾性域における横衝撃問題と縦衝撃問題を取り上げ、その適用方法と適用性について実験結果や理論解と比較、検討を行った。

#### 3.1 個別要素法による縦衝撃問題解析

縦衝撃問題を解析でどの程度近似できるかを検討するため、一端固定棒の弾性範囲内での理論解との比較を行った。図-3に示すような一端固定棒に対して図-4に示すステップ荷重 ( $P_0 = 6\text{kN}$ ) を作用させた。

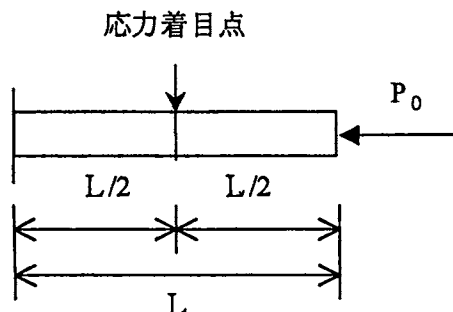


図-3 一端固定棒

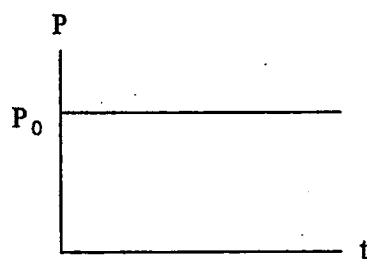


図-4 ステップ荷重

要素分割数は、図-5のように 66 個 (2 段×33)、268 個 (4 段×67)、1064 個 (8 段×133) の 3 種類を用い、 $\Delta t = T/20$  で計算を行った。

図-6に本解析と理論解による棒中央の応力の応答曲線を示す。この図において応力は荷重  $P_0$  を静的に載荷した時の応力  $\sigma_0 = P_0/A$  で無次元化し、時間は、応力波がモルタル角柱を往復する時間  $\tau$  で無次元化した。計算は  $10\tau$  まで行った。応力は、理論解では規則的な矩形波であるが本解析は立ち上がり後、振動しながら理論解に近づいていく。本解析が初期値問題として差分法によるため、時間の経過とともに応力値は理論解からわずかに外れていく傾向が認められるが、位相のずれはどれもほとんどない。応力は要素分割数が多いほど振動が小さく、はり高の 4～8 分割程度では、理論解の矩形波を比較的良好に再現していることがわかる。

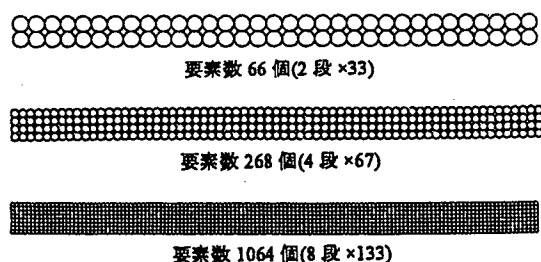


図-5 解析に用いた要素分割数

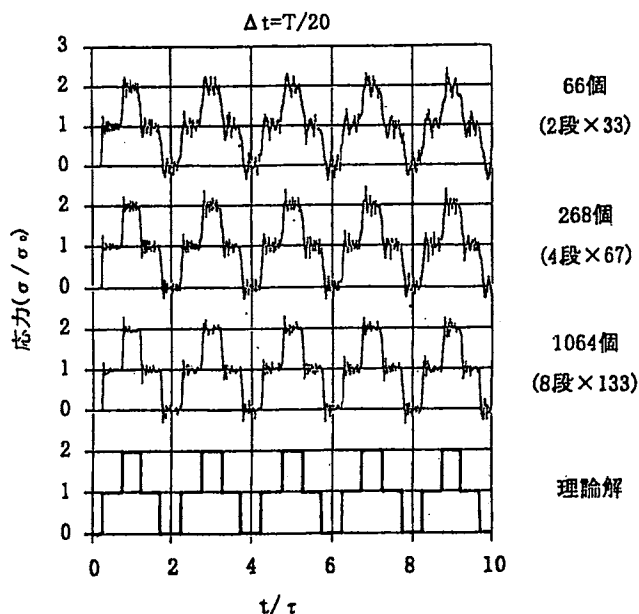


図-6 要素分割数の影響による棒中央の応力応答曲線

### 3.2 個別要素法による横衝撃問題解析

横衝撃を受ける無筋コンクリートはりについて個別要素法を適用した。解析対象としたはり、図-7に示す長さ 180cm で高さ 20cm、奥行き 15cm の単純はりであり、中央に集中荷重が作用するものとした ( $P=20\text{kN}$ )。解析においては、スパン中央を境界にして左右対象であるゆえ、左側半分を計算し、境界条件は、CASE1 に示す通り、支点部の要素はピン支点、スパン中央の要素は、水平方向のみを拘束したローラー支点である。

要素分割数は、図-7に示す 30 個 (3 段×10)、95 個 (5 段×19)、333 個 (9 段×37)、1241 個 (17 段×73)、1911 個 (21 段×91) の 5 種類を用い、 $\Delta t = T/20$  で解析した。図-8は、図

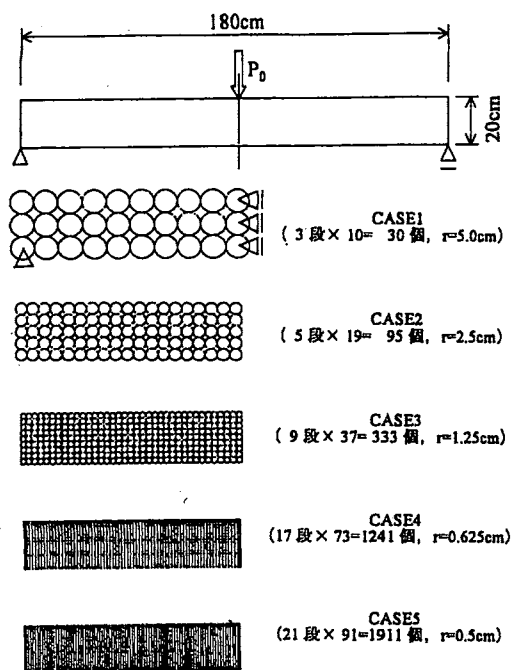


図-7 横衝撃を受けるはりと解析モデル

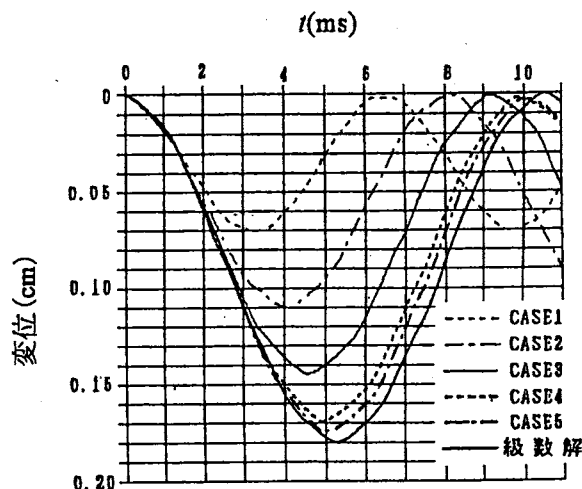


図-8 はりのスパン中央変位の応答曲線

図-4に示したものと同じく単純はりのスパン中央に大きさ  $P_0$  のステップ荷重が作用させた場合のスパン中央点の下縁の変位の時間変化を示したものである。なお、図中に示した理論解とは、次式で表される変位の級数解である。

$$\delta(x,t) = \frac{2P_0 L^3}{\pi^4 EI} \sum_{i=1,3,5,\dots} \frac{(-1)^{(i-1)/2}}{i^4} \sin \frac{i\pi x}{L} \cdot (1 - \cos p_i t) \quad (4)$$

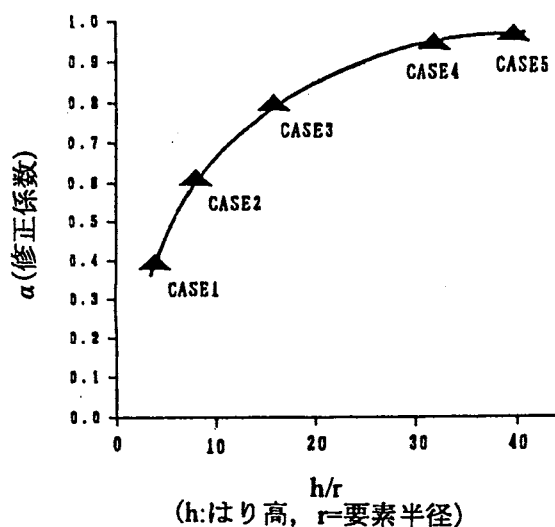
$$p_i = \frac{i^2 \pi^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$$

ここに、 $EI$  ははりの曲げ剛性、 $\rho$  は密度、 $A$  ははりの断面積、 $x$  は支点から部材軸方向の座標、 $t$  は時刻である。これより、要素半径が大きい場合、理論解に比べ応答変位は小さく、周期も短くなっているが、要素半径をある程度小さくして、要素数が多くなると理論解に収束している。図-1に示す基準ばね定数を用いてはりの横衝撃のシミュレーションを行なう場合には、はり高方向に 20 近くの要素分割が必要なことがわかる。個別要素法は離散化解析手法の一種であるため、理論的に連続体解析におけるばね定数を決定することは困難である。そこで、要素分割が粗い場合の適用について次のようなばね定数の使用を検討してみることにする。

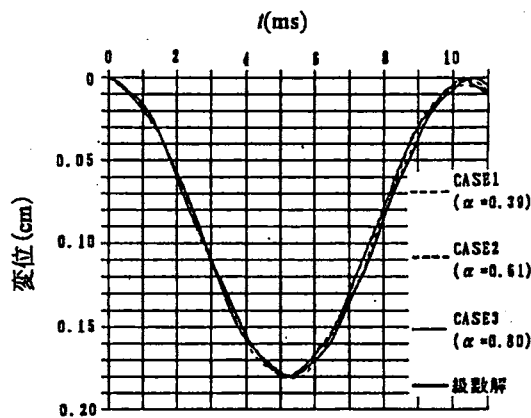
$$k_n' = \alpha \cdot k_n = \alpha \cdot \frac{EA}{2r} \quad (5)$$

$$k_s' = \alpha \cdot k_s = \alpha \cdot \frac{k_n}{2(1+\nu)}$$

ここに、 $k_n$ 、 $k_s$  は図-1に表わされる基準ばね定数であり、 $\alpha$  は要素分割に関する修正係数である。図-9は試行錯誤法により求めた要素分割に関する修正係数  $\alpha$  とそれらの修正係数を用いた解析結果を示したものである。本解析値は級数理論解をよく再現していることが確認できる。これより、比較的粗い要素分割の場合であってもこの修正係数  $\alpha$  を用いれば、よい精度で横衝撃を受けるはりの挙動を解析できることがわかる。



(a)要素分割に関する修正係数 $\alpha$



(b)修正係数 $\alpha$ を用いた変位応答

図-9 要素分割に関する修正係数 $\alpha$ と解析結果

以上から解析で得られた主な結果を以下に示す。

- (1) 一端固定棒の縦衝撃問題における弾性域の理論解と本解析結果とを比較したところ、本解析で用いる要素分割数をはり高の4~8分割、時間増分  $\Delta t$  を固有周期  $T$  の1/20とすることで、棒中央の応力応答を精度よく再現することができた。
- (2) モルタル棒の縦衝撃問題における弾性域の実験結果と本解析結果とを比較したところ、要素分割数をはり高の5分割、時間増分  $\Delta t$  を固有周期  $T$  の1/20とすることで、各断面の応力応答をよくシミュレートできた。
- (3) モルタル棒の縦衝撃問題における破壊を考慮した解析では、エネルギーの流れの追跡も容易に行え、破壊を生ずる場合でも有効な解析方法であることを示した。
- (4) 単純支持ばりの横衝撃問題における弾性域の理論解と本解析結果とを比較したところ、本解析の基準ばね定数を用いる場合、はり高方向に20近くの要素分割、時間増分  $\Delta t$  を固有周期  $T$  の1/20とすることで、はり中央の変位応答を精度よく再現することができた。
- (5) 横衝撃を受ける単純ばりを適用する際、要素が粗い場合については、要素分割に関する修正ばね定数を、要素配列が異なっている場合については、配列形式に関する修正ばね定数を提案し、理論的に設定困難であったばね定数を明らかにした。

#### 4. RCはりの衝撃破壊特性と個別要素法による解析

RC はりの比較的低速度の重錘衝突による衝撃破壊挙動の解明をめざすためには、実験を補間する上で数値解析法が必要であり、個別要素法を適用した。

ここでは、著者らが行った RC はりの衝撃実験に本解析手法を適用し、材料のひずみ速度効果による影響について比較、検討する。衝撃実験には、図-10に示すような重錘落下実験装置を使用した。これは、質量約 14kg の鋼板を所定の質量に重ね合わせたものとロードセルとを一体化した重錘を、磁石を用いて所定の高さまで釣り上げ自由落下させる自由落下式の実験装置である。

実験に用いた鉄筋コンクリート供試体と解析に用いたモデルを図-11に示す。ひずみ速度効果による影響を実験値と比較検討するために、解析に用いたケースは表-1に示す通りである。ただし、 $DIF_{cs}$ 、 $DIF_{cs}$ 、 $DIF_s$  は、それぞれひずみ速度効果によるコンクリートの圧縮強度増加率、引張強度増加率、鉄筋およびスターラップの強度増加率である。解析のケースは、ひずみ速度効果を、鉄筋とコンクリートのどちらも考慮しないもの (CASE A)、コンクリートのみを考慮するもの (CASE B)、鉄筋のみを考慮するもの (CASE C) そして鉄筋とコンクリートのどちらも考慮するもの (CASE D) の4種類とした。解析結果の一例を図-12、13に示す。

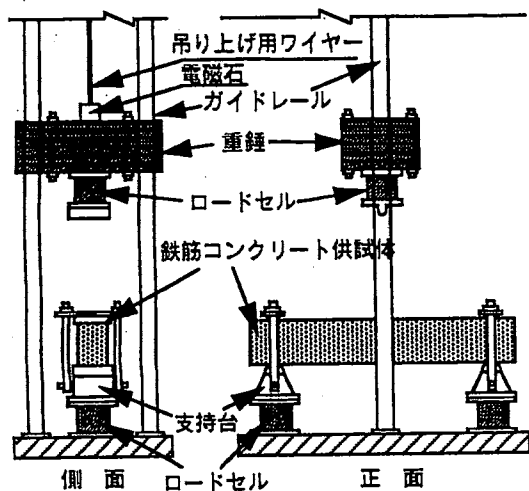


図-10 重錘落下式実験装置図

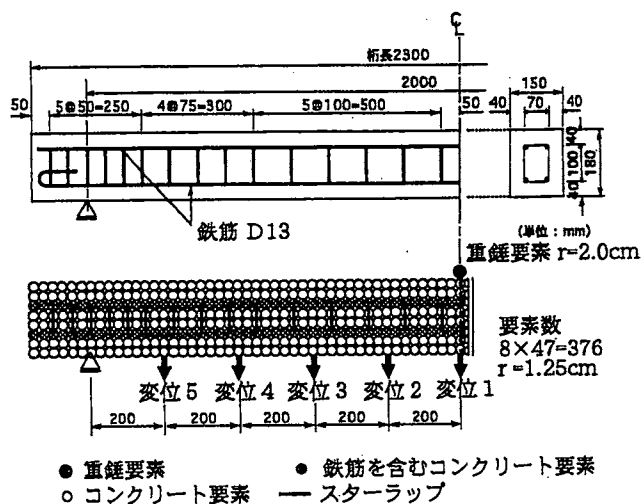


図-11 供試体と解析モデル図

表-1 各ケースにおける動的強度増加率

CASE	DIF <sub>cc</sub>	DIF <sub>ct</sub>	DIF <sub>s</sub>
A	-	-	-
B	1.7	3.7	-
C	-	-	1.2
D	1.7	3.7	1.2

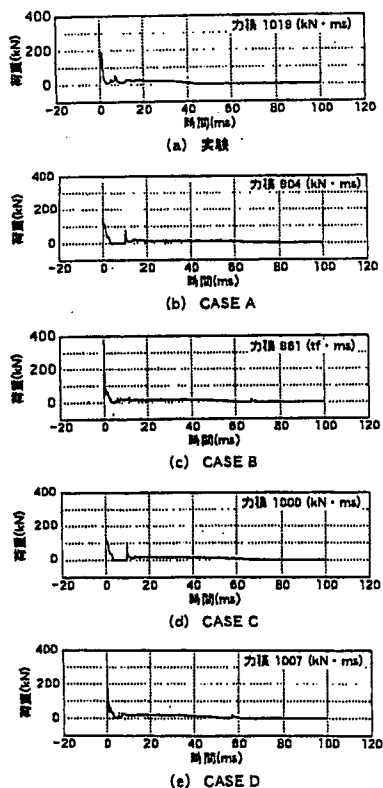


図-12 荷重波形

(ひずみ速度効果の影響, 衝突速度400cm/s)

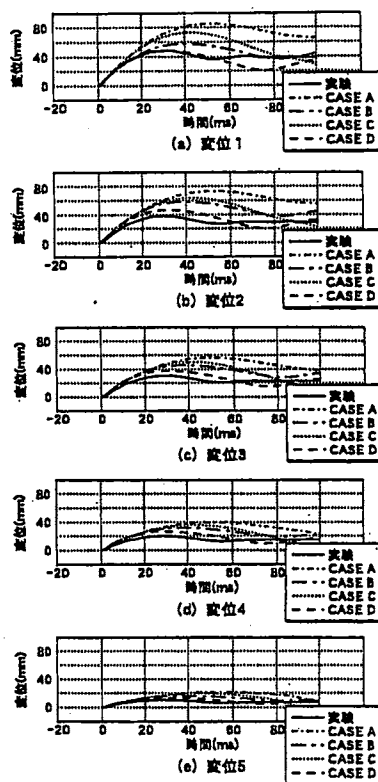


図-13 変位波形

(ひずみ速度効果の影響, 衝突速度400cm/s)

図-12は重錘質量 193kg, 衝突速度 400cm/s の条件下での荷重波形を示したものである。初期の荷重最大値はコンクリートのひずみ速度効果を考慮していない CASE A と CASE C で小さく、コンクリートのひずみ速度効果を考慮した CASE B と CASE D では大きくなっている。これよりコンクリートのひずみ速度効果の方が鉄筋のひずみ速度効果に比べ最大値に与える影響が大きいことがわかる。一方、力積については、CASE A で最も小さく、CASE B, CASE C, CASE D の順で大きくなっている。これより、鉄筋のひずみ速度効果の方がコンクリートのひずみ速度効果に比べ力積に与える影響が大きいことがわかる。また、本計算例では CASE D, すなわちコンクリートと鉄筋双方のひずみ速度効果を考慮した場合が、最も実験をよく再現している。

図-13は各点における変位波形を示したものである。変位の最大値はどの点においても CASE A で最も大きく、CASE C, CASE B, CASE D の順で小さくなっている。これよりコンクリートのひずみ速度効果の方が鉄筋のひずみ速度効果に比べ最大値に与える影響が大きいことがわかる。本計算例では CASE D, すなわちコンクリートと鉄筋双方のひずみ速度効果を考慮した場合の変位波形が最も実験波形を再現している。

以上から限られた条件下ではあるが、個別要素法の鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動解析への適用方法と鉄筋コンクリート衝撃特性についていくつかの知見を示した。主な結論は、以下の通りである。

- (1) 3種のコンクリートの軟化モデルを用いたシミュレーションを行った結果、本研究範囲内では、破壊挙動に及ぼすコンクリートの軟化特性の影響は小さいことがわかった。
- (2) コンクリートと鉄筋の材料特性に既往の研究に基づくひずみ速度効果を考慮した結果、それらの衝撃挙動に与える影響が大きいことが明らかとなった。
- (3) コンクリートのひずみ速度効果は衝撃荷重波形に与える影響が大きく、鉄筋のひずみ速度効果の影響は小さいことがわかった。
- (4) 本解析法によれば、コンクリートと鉄筋双方のひずみ速度効果を考慮することにより、実験で得られた衝撃応答を比較的良好に再現できることを示した。
- (5) 衝突速度の増加、すなわち衝突エネルギーを増加させた場合、コンクリートの吸収エネルギーの増加率は低下し、逆に鉄筋の吸収エネルギーが増加することを解析的に示した。
- (6) 衝突エネルギー一定の下では、衝突速度と荷重の最大値に、また衝突体の質量と荷重作用時間にも相関関係があることを解析的に示した。さらに、鉄筋コンクリート部材の衝撃挙動を直接支配する衝突時に発生する荷重による力積は、衝突体の運動量が多いほど大きいことが明らかとなった。

## 5. 個別要素法と有限要素法の結合解析法による落石衝突解析

ここでは、落石覆工において砂や粘土などの変形や流動量の大きい緩衝層（離散体）に対しては個別要素法を用い、変形量の小さい構造物（連続体）には有限要素法を用いたハイブリッド数値解析法を開発し、その解析方法を用いて落石覆工の衝撃特性について様々な検討を行った。

実験は、図-14に示す落石覆工の屋根部のモデルである鉄筋コンクリート版（縦横 3.4m, 厚さ 0.2m）を4点単純支持で設置し、その上にサンドクッション（クッション厚さ 0.5m）を敷き、鉄筋コンクリートを充填した重錘を自由落下させるものである。落石として用いた重錘は、質量が 100kg, 500kg そして 1,000kg のいずれも底面形状が球形のものである。実験時には、重錘の加速度、サンドクッション底部（鉄筋コンクリート板上）での圧力をロードセルで、また反力と鉄筋コンクリート板の変位が測定されている。

この実験に対する解析モデルは、図-15に示すように設定した。重錘は、質量 100kg, 500kg, 1,000kg で、いずれも奥行 3.4m の円筒要素と仮定し、所定の高さに対応した自由落下による初速度を持たせてサンドクッション中央に配置した。なお、重錘半径は、比重 2.6 の球とみなしたときの半径を用い、質量 100kg, 500kg, 1,000kg の直径は、それぞれ 41.8cm, 71.6cm, 90.2cm である。サンドクッションは、厚さ 0.5m, 幅 3.4m, 奥行 3.4m の範囲であり、半径 2.5cm の2次元円筒要素 743 個を用いた。覆工は、幅 3.4m, 厚さ 0.2m, 奥行 3.4m であり、はり要素 34 個で表現した。

図-16は、重錘質量 100kg, 落下高さ 5m の場合の実験値、本解析値および板要素による FEM



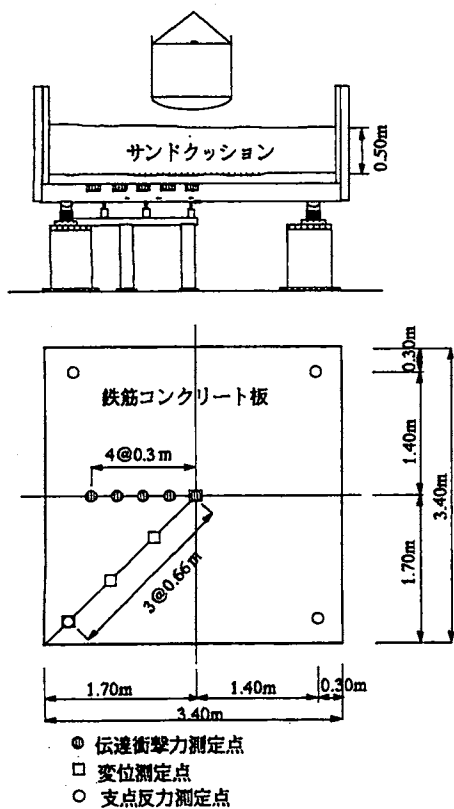


図-14 コンクリート版上への  
落石実験の概要

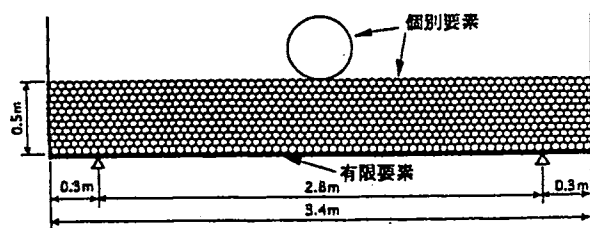
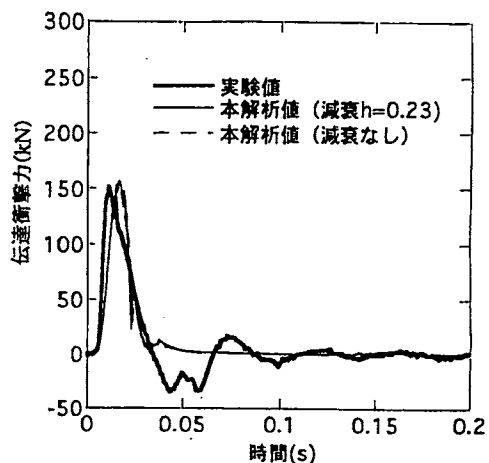
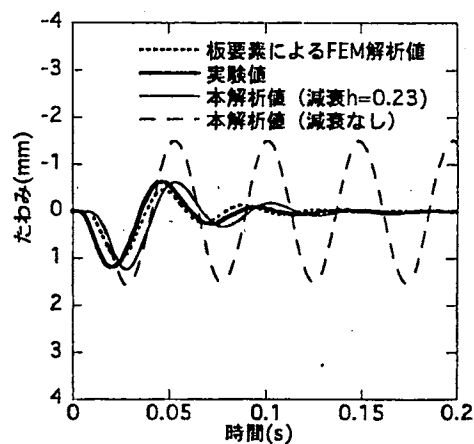


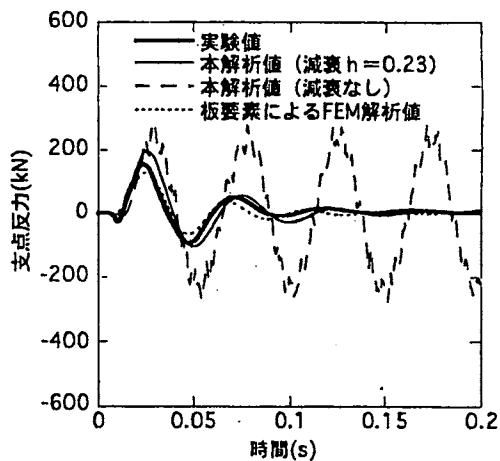
図-15 用いた解析モデル



(a)伝達衝撃力



(b)たわみ



(c)支点反力

図-16 構造減衰の影響

解析値を示したものである。解析における減衰は、本解析手法および FEM 解析とも、実験で得られた覆工の 1 次モードの減衰定数  $h_1=0.23$  に対応したレーリー減衰を用いた。本解析モデルとしては、先述した図-15の通りであり、入力荷重は重錘に初速度を与えてサンドクッション中央に配置した。なお参考までに、本解析値については減衰を考慮しない場合も示した。また FEM 解析による板モデルは、板を 1,156 要素 ( $34 \times 34$ 、一辺 10 cm) に分割し、荷重としては、図-16(a)に示す実験で得られた伝達衝撃力を三角形で近似し、中央部 90cm  $\times$  90cm の領域に等分布荷重として作用させた。伝達衝撃力に関しては、立ち上がりは、実験に比べ本解析値がやや遅れるが、最大値は、本解析値が実験値とほぼ一致している。また、伝達衝撃力は減衰の影響は小さことがわかる。たわみに関しては、立ち上がりは本解析手法および FEM 解析とも実験値に比べやや遅れるが、最大値は両者とも実験値とほぼ一致し、実験をよく再現している。支点反力に関しては、最大値は、本解析では実験値より若干大きく、FEM 解析では実験より若干小さいが、波形形状は実験値をよく再現している。

このように実験値を参考に試行錯誤による検討を行えば、2次元モデルによる本解析手法でも、このように実際の現象をかなりの精度で再現できることが確認でき、2次元解析に用いる基本諸定数を、表-2に示す値とした。

図-17は、重錘質量別の落下高さとの関係について、実験結果と解析結果を示したものである。なお、図中には、次式で表される落石対策便覧式を示した。

$$P = 2.108 \cdot \lambda^{2/5} \cdot (m \cdot g)^{2/3} \cdot H^{3/5} \quad (6)$$

ここに、 $\lambda$ はサンドクッションのラメ定数（本例では、10,000 kN/m<sup>2</sup>を示した）であり、 $m$ は落石質量(t)、 $H$ は落石の落下高さ(m)である。質量が 100kg の場合、伝達衝撃力及びたわみは、 $H=5.0$ m 以下では解析値は実験値とほぼ一致しているが、 $H=7.5$ m 以上では、やや実験値に比べ解析値がやや小さい傾向が表れた。支点反力は、各条件とも解析値は、実験値とほぼ一致している。一方、質量が 500kg および 1,000kg の場合、伝達衝撃力、たわみ、支点反力とも実験値に比べ解析値がやや大きい傾向が認められた。このように若干ばらつきがあるものの、解析は実験結果をよく再現しており、本解析方法の有効性が確認できる。

本研究で用いている個別要素と有限要素法の結合法による解析を用いれば具体的にエネルギー伝達量を求めることができるが、現時点では各種の条件下で予測するのは一般に困難である。そこでここでは、単純な構造に限定するが覆工への伝達衝撃力の評価方法について検討した。

衝撃現象では一般に衝突体および被衝突体の速度、質量、材料特性などが現象を支配する因子として考えられるが、その中でも質量がもっとも重要な因子と考えられる。これは覆工へのエネルギー伝達率にも大きく影響を与えると推測される。こういった観点より覆工質量  $M$  と重錘質量  $m$  の比  $M/m$  をエネルギー伝達率に乗じた  $(E_i/E_p) \times (M/m)$  と  $T_d/T$  の関係を示したのが図-18である。これより、4本の曲線はこのようなパラメーターの導入により、以下に示す曲線で近似することができる。ここで、 $E_p$  は重錘のもつエネルギー、 $E_i$  は覆工へ伝達されたエネルギー、 $T_d$  は覆工への伝達衝撃力の作用時間、 $T$  は覆工の固有周期である。

$$\left( \frac{E_i}{E_p} \right) \cdot \left( \frac{M}{m} \right) = -1 + \frac{2.5}{(T_d/T)} \quad (7)$$

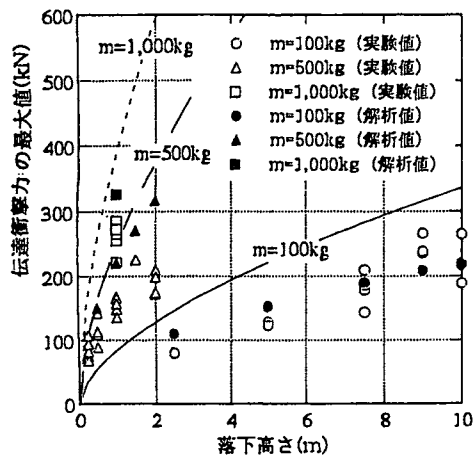
以上のように、 $T_d/T$  の関係 ( $M$ 、 $m$  および  $E_p$  は既知) から一般的な覆工へのエネルギー伝達率の評価ができれば、等価衝撃力の推定も可能となる。

例えば、覆工の中央変位から得られる等価衝撃力  $P_{eq}$  を用いると伝達エネルギーは、

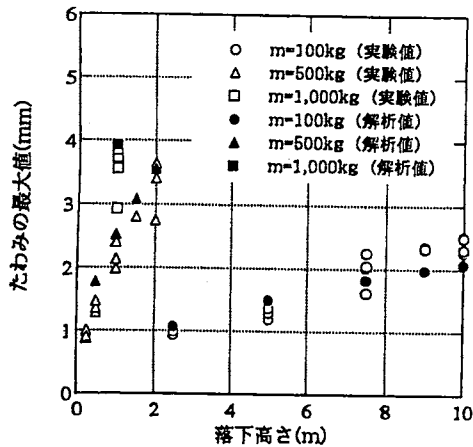
$$E_i = \frac{1}{2} P_{eq} \delta_{\max} = \frac{1}{2} \frac{P_{eq}^2}{k_d} \quad (8)$$

表-2 解析に諸定数

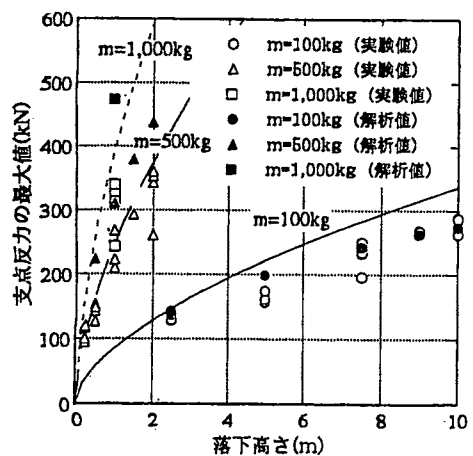
落 石 ( 重 錘 )			
質量 (kg)	100	500	1,000
半径 (cm)	20.9	35.8	45.1
落下高さ (m)	2.5, 5.0, 7.5, 9.0, 10.0	0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	1.0
サ ン ド ク ッ シ ョ ン			
要素半径 (cm)	2.5		
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	18		
要素間の内部摩擦角 (度)	30		
壁面と要素との内部摩擦角 (度)	15		
法線方向バネ定数 $k_n$ (kN/m)	4000		
透減率 $s$	0.25		
法線方向減衰定数 $h_n$	0.6		
接線方向減衰定数 $h_t$	1.0		
覆 工			
単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	25		
重量 (kN)	57.8		
ヤング係数 $E$ (GPa)	29.7		
断面2次モーメント $I$ (m <sup>4</sup> )	$2.27 \times 10^{-3}$		



(a)伝達衝撃力



(b)たわみ



(c)支点反力

図-17 落下高さと衝撃特性値

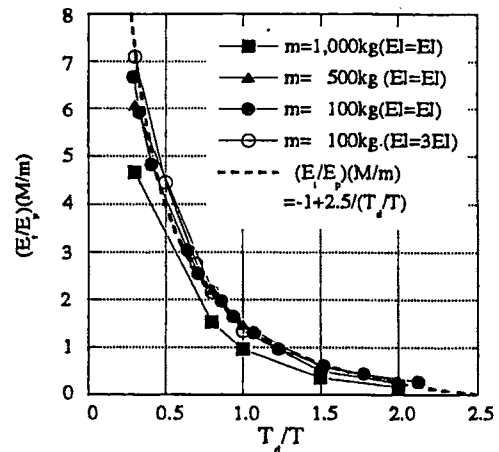


図-18 エネルギー伝達率推定評価式

表-3 エネルギー伝達と衝撃力評価例

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
落石質量 $m$ (t)	0.1	0.5	1
落下高さ (m)	20	4	2
初期エネルギー $E_p$ (kJ·m)	20	20	20
覆工質量 $M$ (t)	20	20	20
スパン長 $L$ (m)	3	3	3
弾性係数 $E$ (GPa)	30	30	30
断面2次モーメント (m <sup>4</sup> )	0.005	0.005	0.005
固有周期 $T$ (s)	0.04	0.04	0.04
土圧衝撃力作用時間 $T_d$ (s)	0.030	0.044	0.053
$T_p/T$	0.77	1.13	1.36
$(E_t/E_p)(M/m) = -1 + 2.5/(T_p/T)$	2.24	1.21	0.83
エネルギー伝達率 (%)	1.12	3.02	4.16
伝達エネルギー $E_t$ (kJ·m)	0.224	0.604	0.833
衝撃力 $P_{eq}$ (kN)	345.47	567.48	666.43
参考：落石対策便覧式			
$\lambda = 10,000$ kN/m <sup>2</sup>	499.62	556.21	582.51
$\lambda = 5,000$ kN/m <sup>2</sup>	378.64	421.53	441.46
$\lambda = 1,000$ kN/m <sup>2</sup>	198.90	221.43	231.90

と表現できる。これより伝達エネルギーを用いて衝撃力が次式で表現できることになる。

$$P_{eq} = \sqrt{2 \cdot k_d \cdot E_t} \quad (9)$$

表-3に式(7)及び(8)の評価式を用いた計算例を示す。CASE1は落石質量 100kg、落下高さ 20m とし、CASE2は落石質量を 5 倍で落下高さを 1/5 倍、CASE3は落石質量を 10 倍で落下高さを 1/10 倍と全て落石の初期エネルギーを同じとした。なお、覆工の諸元は全ケース同じとした。本推定評価式によると落石の初期エネルギーが同じであっても落石質量が異なる場合エネルギー伝達率が異なり落石質量が大きいほど伝達エネルギーは大きくなっている。結果として、落石対策便覧式では衝撃力に落石の質量の影響はそれほど大きな差はないのに対し、エネルギー伝達率より算出した衝撃力では影響が大きいことがわかる。

以上から得られた主な結論をまとめると以下のとおりである。

- (1) 2次元の個別要素法(D.E.M)とはり要素を用いる有限要素法(F.E.M)の結合解析法を開発し、その手法を具体的に示した。
- (2) 実験値との比較によりサンドクッションを有する覆工上への落石衝撃問題の解析に本解析方法が有効であることを示した。
- (3) 各種の条件下においてシミュレーション解析を行い、落石質量が 100kg ~ 1,000kg で落下高さが 10m 以内での衝撃力特性を明らかにした。
- (4) 落石衝突エネルギーがどのように伝達されるか具体的に示すとともに、緩衝材の力の低減効果とは別にそのエネルギー吸収能が覆工への伝達エネルギーに大きく影響することを示した。
- (5) サンドクッションを介して落石覆工に伝達されるエネルギー量を荷重の作用時間  $T_d$  と構造の一次固有周期  $T$  との関係で明らかにした。
- (6) 落石覆工への伝達エネルギーを落石質量  $m$ 、単純はり形式の覆工の質量  $M$  と荷重の作用時間  $T_d$  と覆工の一次固有周期  $T$  で精度よく推定できる評価式を示した。
- (7) 覆工への伝達エネルギーが比較的小さい場合には、弾性解析によるエネルギー伝達率は弾塑性結果によるエネルギー伝達率より大きいため、覆工へのエネルギー伝達率を評価する際、弾性解析により得られるエネルギー伝達率を用いることが可能である。

## 学位論文審査結果の要旨

当該学位申請論文に関し、平成 14 年 1 月 22 日に第 1 回審査委員会を開催し、論文内容を検討した。さらに、平成 14 年 1 月 31 日の口頭発表会の後に開催した第 2 回学位論文審査会において協議した結果、以下のように判定した。

本論文は個別要素法による RC 構造部材などの衝撃破壊解析と落石覆工の衝撃問題解析に関する研究である。まず、粒状体の解析に用いられてきた個別要素法の連続体解析への適用性を検討し、棒の縦衝撃問題、はりの横衝撃問題について提案した解析方法の妥当性と有効性を示している。次に、鉄筋コンクリートはりの衝撃挙動特性を解明するために種々の条件下における重錘落下衝撃実験を行い、はりの破壊形態、応答特性を明らかにしている。また、個別要素法を用いた鉄筋コンクリートはりの衝撃破壊解析方法について検討し、実験で明らかになったはりの衝撃挙動特性をよく再現できることを示している。さらに、落石時の覆工の衝撃挙動を解明するために、離散体であるサンドクッションを個別要素で覆工を有限要素で解析する 2 つの手法を結合させた方法を開発している。この手法を用いて落石の衝突条件と覆工の衝撃特性の関係について明らかにし、覆工に伝達されるエネルギー量の推定評価式の提案を行っている。

以上、本論文の成果は落石覆工などの衝撃を受ける構造物の設計技術に大きく寄与するものであり、工學上有用な知見を得たものと認められる。よって、本論文は博士(工學)論文に値すると判定する。